第 37 卷第 6 期 生 态 学 报 Vol.37,No.6
2017 年 3 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Mar.,2017

DOI: 10.5846/stxb201510282178
严友进,戴全厚,伏文兵,彭旭东,靳丽.喀斯特裸坡产流产沙过程试验研究.生态学报,2017,37(6):2067-2079.
Yan Y J,Dai Q H,Fu W B,Peng X D,Jin L.Runoff and sediment production processes on a Karst bare slope.Acta Ecologica Sinica,2017,37(6):2067-2079.

喀斯特裸坡产流产沙过程试验研究

严友进[1],戴全厚[1,*],伏文兵[1,2],彭旭东[1],靳 丽[1]
1 贵州大学林学院, 贵阳 550025
2 贵州晟泰工程咨询有限公司, 贵阳 550002

摘要:运用可调坡度、地下孔(裂)隙度试验钢槽装填土石模拟喀斯特裸坡,采用人工模拟降雨的方法探索了喀斯特裸坡产流产沙过程。结果表明:降雨强度、坡度和地下孔(裂)隙度对喀斯特裸坡产流产沙均有明显的影响。(1) 在 30、50、80mm/h 降雨强度下地表产流产沙存在临界降雨强度,临界降雨强度在 50—80mm/h 之间,地下孔(裂)隙产流量和产沙量均随降雨强度增大呈现先增大后减小的变化趋势,产流量随降雨强度变化顺序为 50>30>80mm/h,产沙量随降雨强度大小变化顺序为 50>80>30mm/h。(2)随着坡度增大,地下输沙模数减小,其大小随坡度变化的顺序为 10°<15°<20°<25°;同一降雨历程内,坡度越小,单位时间内的地下输沙模数减小量越大,其大小随坡度变化的顺序为 10°>15°>20°>25°。(3)地下孔(裂)隙度对地下产流产沙影响显著,地下孔(裂)隙度的增大使地下流失量增大。地下产流比重、产沙比重均随地下孔(裂)隙度的增大而增大,大小顺序均为 1%<3%<5%。研究有助于深入了解喀斯特坡地土壤侵蚀机理,为喀斯特石漠化治理和生态修复提供理论依据。
关键词:喀斯特土壤侵蚀;二元结构;人工降雨;地下孔(裂)隙;产流产沙

Runoff and sediment production processes on a Karst bare slope

YAN Youjin[1],DAI Quanhou[1,*],FU Wenbing[1,2],PENG Xudong[1],JIN li[1]
1 *College of Forestry, Guizhou University, Guiyang* 550025, *China*
2 *Guizhou Shengtai Engineering Consulting Co. Ltd. Guiyang* 550002, *China*

Abstract: Artificial rainfall experiments were carried out on a simulated Karst bare slope in a steel tank, where the slope and degree of underground holes (cracks) could be adjusted, to study the production processes of runoff and sediment in these environments. During experiments, the tank was filled with soils and rocks. Results indicated that rainfall intensity, slope and degree of underground holes (cracks) had obvious influences on runoff and sediment production processes. (1) Sediment was produced from the soil surface when the actual rainfall intensity was greater than the critical rainfall intensity of 50—80 mm/h. Runoff and sediment yield changed with varied rainfall intensities, and the order of the runoff yield for three rainfall intensities was 50>30>80 mm/h, and the order of the sediment yield for three rainfall intensities was 50>30>80 mm/h, respectively. (2) The underground sediment transport modulus decreased with increased slope, and the order of the sediment transport modulus for four slopes was 10°<15°<20°<25°. In the same rainfall event, we noted that the smaller the slope, the greater the sediment transport modulus reduction per unit time, and the order of the sediment transport modulus for the four slopes was 10°>15°>20°>25°. (3) The degree of underground holes (cracks) had a significant effect on underground runoff and sediment yields. An increase in the degree of underground holes (cracks) led to increased underground soil erosion. Underground runoff and sediment yields increased with an increase in the degree of underground

基金项目:国家自然科学基金项目(41461057,41061029);贵州省应用基础重大专项课题(黔科合 JZ 字[2014]200207);贵州大学引进人才科研项目(贵大人基合字[2015]63 号)

收稿日期:2015-10-28; **网络出版日期**:2016-08-02

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: qhdairiver@163.com

holes (cracks), and the order of underground runoff and sediment yields for three underground hole degrees was 1%<3%<5%. This study provides a deeper understanding of the mechanisms of soil erosion in Karst slope habitats and provides a theoretical basis for the management of rocky desertification control and ecological restoration.

Key Words: Karst soil erosion; dual structure; artificial rainfall; underground holes (cracks); runoff and sediment yields

土壤侵蚀造成喀斯特地区石漠化进程加快,严重危害该地区的生态环境安全[1]。影响喀斯特土壤侵蚀的环境因素主要包括气候、地质地貌、坡度等[2]。雨水动能和重力势能的综合作用是石漠化形成的主要原动力[3],受第三纪以来的地质构造运动的作用,碳酸盐岩地区呈现出环境层面多、坡度大、垂向喀斯特发育剧烈,为喀斯特土壤侵蚀提供了动力潜能[4-5]。喀斯特地区强烈的溶蚀作用形成地下溶洞、地下暗河及在表层岩溶带溶蚀形成的各种形态的裂隙,组成了喀斯特地下岩溶管道,与地表组成了不均匀的"二元结构"[6-8]。"二元结构"的存在使得喀斯特地区存在地表与地下水土流失方式[9-10],在降雨条件下或含水量较高时堆积在地下孔隙中的土壤体往往呈可塑、软塑甚至流塑状态进入地下岩溶管道,形成喀斯特地区特有的"地下漏失"[11]。

目前,关于喀斯特地下土壤侵蚀的研究相对较少,刘志刚指出喀斯特地区地表土壤在径流的作用下沿落水洞进入地下岩溶系统[12]。喀斯特地区土壤侵蚀的研究方法多局限于研究地表的水土流失,对地下漏失的研究极为薄弱。主要是对地下流失的发生机制及普遍性、地下侵蚀机理和概念模型等方面做了少量的研究,其中陈晓平提出喀斯特地区石隙刷蚀是一种隐蔽性的侵蚀,其容易受到忽视,但却是对促进坡面彻底石漠化有积极的作用[13];万恒松等简要的总结了地下水土流失的特点、机理和影响因素[14];周念清等在对普定县的地形特征、岩性特点和水文条件调查的基础上,综合上分析了喀斯特地区水土流失的作用机理[15];唐益群等以普定县陈旗小流域为研究对象,研究得出喀斯特地区特殊的地质环境是导致土壤地下漏失的主要因素之一[16];张信宝等利用^{137}Cs技术测定洼地泥沙沉积速率,并利用混合模型对地下土壤流失量进行了粗略计算[17]。而从坡地尺度综合研究地表、地下侵蚀产流产沙的研究更为少见,相关的报道主要是通过人工降雨模拟试验研究坡度、雨强、岩石裸露率、地下孔(裂)隙度等因子对坡地土壤侵蚀的响应,杨智等通过设置不同降雨强度和地下孔裂隙度探讨了喀斯特坡面产流产沙机理[18];刘正堂通过模拟不同岩石裸露率、雨强和地下孔(裂)隙度揭示了喀斯特坡面径流揭示喀斯特坡地土壤侵蚀特征[19]。本文模拟喀斯特裸坡微地貌及地下孔(裂)隙结构,选取降雨强度、地下孔(裂)隙度和坡度3个自然因子,分析喀斯特裸坡在地表与地下两个方向上的土壤侵蚀动态特征,为喀斯特地区土壤侵蚀防治及生态恢复研究提供重要的理论依据。

1 研究方法与试验设计

1.1 试验设备及材料

1.1.1 试验设备

试验设备主要由自主设计的变坡钢槽(专利编号CN:ZL201010545602.7)[20]和降雨器组成,其中变坡钢槽规格为长4.0m,宽1.5m,深0.35m,钢槽底部由两块均匀分布有192个直径5cm的孔的底板组成,通过调节底板孔洞的重合面积进行调节孔隙度大小,孔隙度调节范围0—8%,坡度调节范围0—45°,钢槽设有地表、地下孔(裂)隙流集流槽。降雨器采用西安清远测控技术有限公司生产的QYJY-501型便携式全自动下喷式人工模拟降雨器,由降雨器、雨量计、水泵及控制器组成。降雨器降雨高度6m,降雨设备的有效面积为6.5m×6.5m,均匀度>85%,降雨设备的调节精度为7mm/h,调节变化时间<30s,降雨强度可有控制器自动控制或手动控制,降雨历时任意可调。

1.1.2 试验材料

试验所用土壤为2014年8月取自贵阳市花溪区洛平村(26° 24′ 41.4396″N,106° 39′ 53.4384″E)的碳酸

盐岩发育的石灰性粘壤土,试验不对土壤过筛,仅分散较大的土壤团块。

1.2　试验设计

试验模拟喀斯特石漠化地区自然坡面的地表、地下“二元结构”环境下的土壤侵蚀产流产沙特征。试验选取岩石裸露率、降雨强度、坡度及地下孔(裂)隙度 4 个因素。试验设置岩石裸露率 10%,降雨强度 30,50,80 mm/h,坡度 10°,15°,20°,25°,地下孔(裂)隙度 1%,3%,5%,进行交叉试验,共 36 个处理。其中岩石裸露率、坡度和地下孔(裂)隙度是根据对贵州省贵阳市南明区、花溪区和安顺市普定县的 30 个坡地样地以及 32 个岩石剖面的调查结果。降雨强度是结合张文源等提出喀斯特黄壤坡耕地侵蚀性降雨指标在 15mm 左右与水文资料显示研究区一年中有 90%的降雨强度在 50—120mm/h 之间的基础上设置的[21]。采用≥30 cm 直径的石灰岩块石随机排列边坡钢槽中以模拟坡面基岩裸露率,待基岩排列达到设计水平后在钢槽内分 3 层进行填土,每层 10 cm,每层土壤紧实度按野外实测数据自上而下为 410,760,1070 KPa。每场降雨历时 90 min,每 10 min 收集一次地表、地下孔(裂)隙径流水样,共计 9 个降雨时段。试验开始前先进行降小雨(<30 mm/h)沉降,再将降雨强度、坡度、地下孔(裂)隙度调整设计水平,待土壤水饱和产流后开始计时按测定时段收集水样。每个处理重复两次,共 72 场降雨。

1.3　研究方法

(1)坡面岩石裸露率

先将变坡钢槽调至设计坡度后,将碳酸岩石随机排列在变坡钢槽中,并对岩石露头大于 30 cm 的面积进行测量,将岩石露头面积调至占变坡钢槽表面积的 10%。将土壤装填到钢槽中至设计水平后,采集坡面垂直影片并利用 ArcGis 校核坡面岩石裸露率。

(2)地下孔(裂)隙度调节

通过调节变坡钢槽底部上下两个底板间孔洞的重合面积进行调节地下孔(裂)隙度,上下两底板孔洞完全重合时地下孔(裂)隙度最大,上下两底板孔洞完全错开时地下孔(裂)隙度最小。地下孔(裂)隙度调节方法为:先通过计算得到地下孔(裂)隙度在设计水平时底板孔洞重合区域的最大弦长,通过摇臂调节孔洞重合区域弦长至设计水平。地下孔(裂)隙度计算公式如下:

$$S_{孔} = \frac{\pi R^2 \arcsin \frac{L}{R}}{90} - 2L\sqrt{R^2 \frac{L^2}{4}}$$

$$P = \frac{S_{孔}}{S_{底}}\%$$

式中,P 为地下孔(裂)隙度(%);$S_{孔}$ 为孔洞重合区域的面积(m^2);$S_{底}$ 为底板的面积(m^2),$6m^2$;π 为圆周率,取 3.14;R 为底板孔洞半径(m),0.025m;L 为孔洞重合区域最大弦长(m)。

(3)坡面土壤紧实度

将试验土样装填至变坡钢槽,每 10 cm 为 1 层,利用土壤紧实仪测定每层土壤的紧实度。

(4)产流量测定

试验开始前将塑料容器放在地表径流与地下孔(裂)隙流相应的收集口,试验开始后利用塑料容器收集相应部位的产流,以每 10 min 为一个测定时段,分别统计各时段内的地表与地下累积产流量及整个降雨历时内的各部位的产流总量。

(5)产沙量测定

地表与地下的产沙量测定为先量取 500 mL 的水样

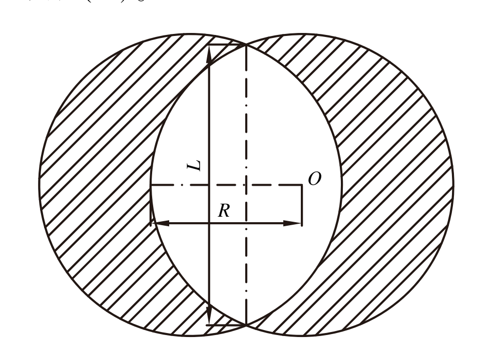


图 1　地下孔(裂)隙度调节示意图

Fig.1　Layout of underground hole (crack) regulation

3 份,然后用定性滤纸(孔径 12.5μm)过滤出水样中的泥沙,并将泥沙转移至烧杯中,放入 105 ℃烘箱烘干,最后用电子天平(精度 0.0001)称重并记录数据。

(6)累积径流量、累积径流量比值计算

$$\text{地表累积径流量} = \sum S_t(\mathrm{L})$$

$$\text{地下累积径流量} = \sum U_t(\mathrm{L})$$

$$\text{累积径流量比值} = \frac{\text{地表累计径流量}}{\text{地下累计径流量}}(\%)$$

$$\text{地下产沙量比重} = \frac{\text{地下产沙量}}{\text{地下产沙量} + \text{地表产沙量}}(\%)$$

式中,S_t为各降雨历时内地表径流量(L),U_t为各降雨历时内地下孔(裂)隙径流量(L)。

2 结果与分析

2.1 降雨强度对产流产沙的影响

2.1.1 降雨强度对产流的影响

降雨是坡面土壤侵蚀的主要驱动力,主要通过降雨侵蚀力及径流量影响坡面侵蚀产沙过程。降雨强度是降雨主要表征因子之一,对坡面径流流速、径流侵蚀力及雨滴击溅有一定的影响[22-23]。由表 1 可知,降雨强度为 30、50 mm/h 时,地表不产生径流;降雨强度为 80 mm/h,地表径流系数介于 0.59—0.74,地下径流系数介于 0.26—0.41。可见,相对较小的降雨强度(<80 mm/h)条件下,裸坡以地下产流为主,降雨强度在 50—80 mm/h 之间存在地表产流的临界降雨强度,80 mm/h 降雨强度下径流以地表产流为主。降雨强度对地下产流量影响显著,地下产流量随降雨强度增大呈先增大后减小趋势。坡度为 10°,15°,20°和 25°条件下,30 mm/h 较 80 mm/h 降雨条件下的地下产流量分别增加了 10.60%,10.20%,11.36%,17.06%;50 mm/h 较 80 mm/h 降雨条件下的地下产流量分别增加了 29.37%,30.87%,25.08%,44.89%。比较不同降雨强度地下产流量差异,可见 80 mm/h 降雨条件下的地下产流量最小,30 mm/h 的次之,50 mm/h 的最大。当降雨强度为 30 mm/h 与 50 mm/h 时,由于降雨强度小于坡面土壤入渗率,故降水渗入土壤并以地下孔(裂)隙径流为主。当降雨强度为 80 mm/h 时,降雨强度大于土壤入渗率,故地表产流而地下产流量减小。

表 1 地下孔(裂)隙度为 5%的地表和地下产流特征

Table 1 Characteristics of surface and underground runoff yield (underground hole (crack) degree =5%)

降雨强度 Rainfall intensity/(mm/h)	坡度 Slope/(°)	类型 Type	径流量 Runoff yield/L	径流系数 Runoff coefficient	降雨强度 Rainfall intensity/(mm/h)	坡度 Slope/(°)	类型 Type	径流量 Runoff yield/L	径流系数 Runoff coefficient
30	10	地表	0	0	30	10	地下	248.9	1
	15		0	0		15		230.1	1
	20		0	0		20		214.7	1
	25		0	0		25		187.35	1
50	10		0	0	50	10		291.15	1
	15		0	0		15		273.25	1
	20		0	0		20		241.15	1
	25		0	0		25		231.9	1
80	10		329.75	0.59	80	10		225.05	0.41
	15		391.90	0.65		15		208.80	0.35
	20		455.20	0.70		20		192.80	0.30
	25		460.05	0.74		25		160.05	0.26

分析各雨强的地下产流量随降雨时段变化可知(图 2),地下产流量与降雨历时呈递增关系,随着降雨历时的后延,单位时间(10 min)内降雨后期的地下产流量大于前期的降雨产流量。其中 80 mm/h 降雨强度下,由于降水量大于入渗率,使得径流大部分以地表径流形式流失,同时土壤含水量更容易趋于饱和,由于土壤无法贮藏更多水,地下孔裂隙的存在使得进入土壤中的水更多的通过地下通道以地下孔裂隙流出现(图 2)。因此 80 mm/h 降雨强度下,同一降雨时段内地表产流量大于地下产流量;随着降雨时段的后延,单位时间内(10 min)地表、地下产流量均呈增大变化。

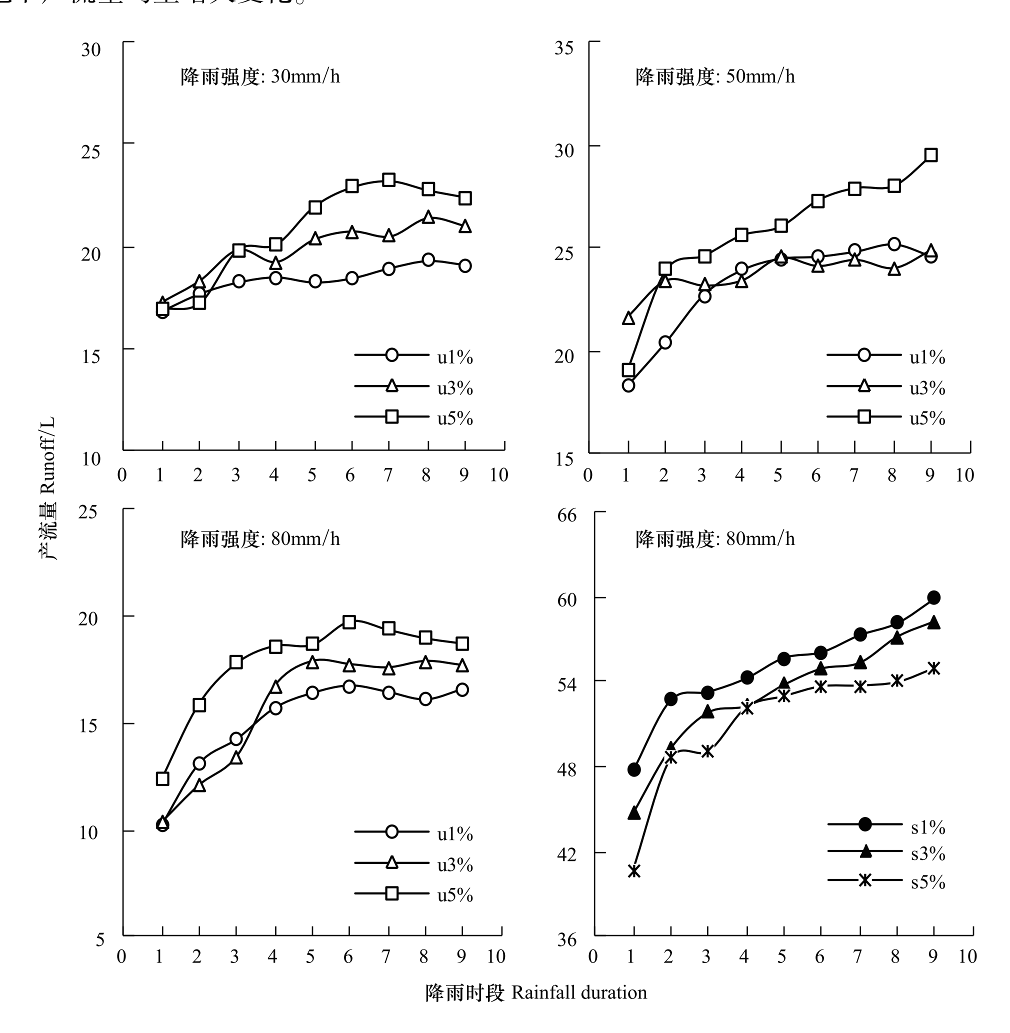


图 2　不同降雨强度条件下地下产流量随降雨历时的变化特征

Fig.2　Variation of underground runoff yield with increase of rainfall duration under different rainfall intensities

图中字母 s 代表地表,字母 u 代表地下;1,2,3,…,10 代表特定时段每个时段代表 10 min

2.1.2　降雨强度对侵蚀产沙的影响

由表 2 可见,相对较小的降雨强度(30,50 mm/h)下,裸坡产沙全部为地下产沙;当降雨强度达到 80 mm/h 时,地表与地下均有产沙,其中地表输沙率在 5.51—6.69 g/min 之间,地下输沙率在 1.19—1.57 g/min 之间,地表输沙率比地下输沙率高达 4.6—5.6 倍。由此可见 80 mm/h 降雨强度下裸坡产沙以地表产沙为主。可见坡面径流为击溅和分散的土壤颗粒提供了载体,故 80 mm/h 降雨强度下地表开始产沙。地下产沙对降雨强度的响应特征表现为地下产沙量随降雨强度增大呈先增大后减小的变化趋势,其中降雨强度为 50 mm/h 的地下产沙量最大,80 mm/h 的次之,30 mm/h 的最小,坡度为 10°,15°,20°和 25°条件下,较 50 mm/h 降雨强度,80 mm/h 降雨条件下的地下产沙量分别降低了 23.09%,23.99%,19.58%,27,91%;30 mm/h 的地下产沙量分别降低了 24.15%,34.58%,40.69%,52.38%。

表 2 地下孔(裂)隙度为 5%的地表和地下产沙特征

Table 2 Characteristics of surface and underground sediment yield (underground hole (crack) degree=5%)

降雨强度 Rainfall intensity/(mm/h)	坡度 Slope/(°)	类型 Type	产沙量 Sediment yield/g	输沙率 Sediment transport rate/(g/min)	降雨强度 Rainfall intensity/(mm/h)	坡度 Slope/(°)	类型 Type	产沙量 Sediment yield/g	输沙率 Sediment transport rate/(g/min)
30	10	地表	0	0	30	10	地下	139.71	1.55
	15		0	0		15		111.81	1.24
	20		0	0		20		92.34	1.03
	25		0	0		25		70.73	0.79
50	10		0	0	50	10		184.20	2.05
	15		0	0		15		170.92	1.90
	20		0	0		20		155.69	1.73
	25		0	0		25		148.53	1.65
80	10		495.51	5.51	80	10		141.66	1.57
	15		577.79	6.42		15		129.92	1.44
	20		645.83	7.18		20		125.20	1.39
	25		602.05	6.69		25		107.08	1.19

从图 3 明显可见在 3 个地下孔裂(隙)度条件下,80 mm/h 的降雨初期的地下径流含沙量最大,降雨强度 50 mm/h 的次之,30 mm/h 的最低。随着降雨历时的延长 3 个降雨强度下的地下含沙量均呈减小变化,30 mm/h 的含沙量极差 R 在 0.16—0.23 之间,50 mm/h 的含沙量极差 R 在 0.34—0.42 之间,80 mm/h 的含沙量极差 R 在 0.44—0.61 之间。基于喀斯特坡地地表产流以蓄满产流为主[24],本研究在开始测定产流产沙之前已进行小雨沉降。由此可见,降雨过程中含沙量的不断减小是由于土壤颗粒在径流作用下向下运动时堵塞了土壤孔隙,导致地下径流含沙量随降雨时间的延长而减小。降雨强度越大,单位时间内雨滴击溅产生的土壤颗粒越多。因此,大的降雨强度下降雨初期的地下径流含沙量最大,而随着降雨历时的延长,同一降雨历程内各时段的地下径流含沙量减小值最大。

2.2 坡度对产流产沙的影响

2.2.1 不同坡度对地表、地下产流的影响

比较不同坡度下地表与地下累积径流量之比,可揭示地表与地下产流量随坡度的动态变化。10°坡度条件下地表与地下累积径流量的比值在 1.0—1.8 之间(图 4),15°坡度条件下地表与地下累积径流量的比值在 1.7—2.8 之间(图 4),20°坡度条件下地表与地下累积径流量的比值在 2.0—3.1 之间(图 4),25°坡度条件下地表与地下累积径流量的比值在 2.8—4.8 之间(图 4),可见各降雨时段的地表与地下累积径流量的比值随坡度的增大而增大,大小顺序为坡度 25°>20°>15°>10°,这与李桂芳等研究结果一致[25]。这一结果表明,80 mm/h 的雨强下,同一降雨时段内随着坡度的增大径流更多以地表径流形式流失。

同一坡度条件下,地表与地下累积径流量比值随降雨历时具有明显的变化特征,坡度为 10°时,累积径流量的比值随降雨历时的延长逐渐增大;坡度为 15°与 20°时,累积径流量比值随降雨历时的延长呈先增大后趋于稳定的变化趋势;坡度为 25°时,累积径流量比值变化特征明显异于 3 个较小坡度时的变化特征,表现为初始降雨的累积径流量比值最大,随着降雨历时的延长累积径流比值逐渐减小。这种差异性的变化在于雨滴击溅分散的土粒填充土壤孔隙导致地表径流量增加,土壤入渗量降低。由于缓坡(坡度=10°)的径流冲刷力弱,地表土壤孔隙被土粒堵塞后,土壤入渗量降低;坡度在 15°与 20°时,坡面的径流冲刷力增强,能够冲走填充在土壤孔隙中部分土粒,但填充量大于或等于冲刷量;陡坡(坡度=25°)的地表径流流速随着径流量的增加其动能增大,对坡面的冲刷能力增强,使填充在土壤孔隙中的土粒被冲开,因此随降雨历时的延长,土壤入渗率增大,而地表径流量减小,二者间的比值趋于稳定。

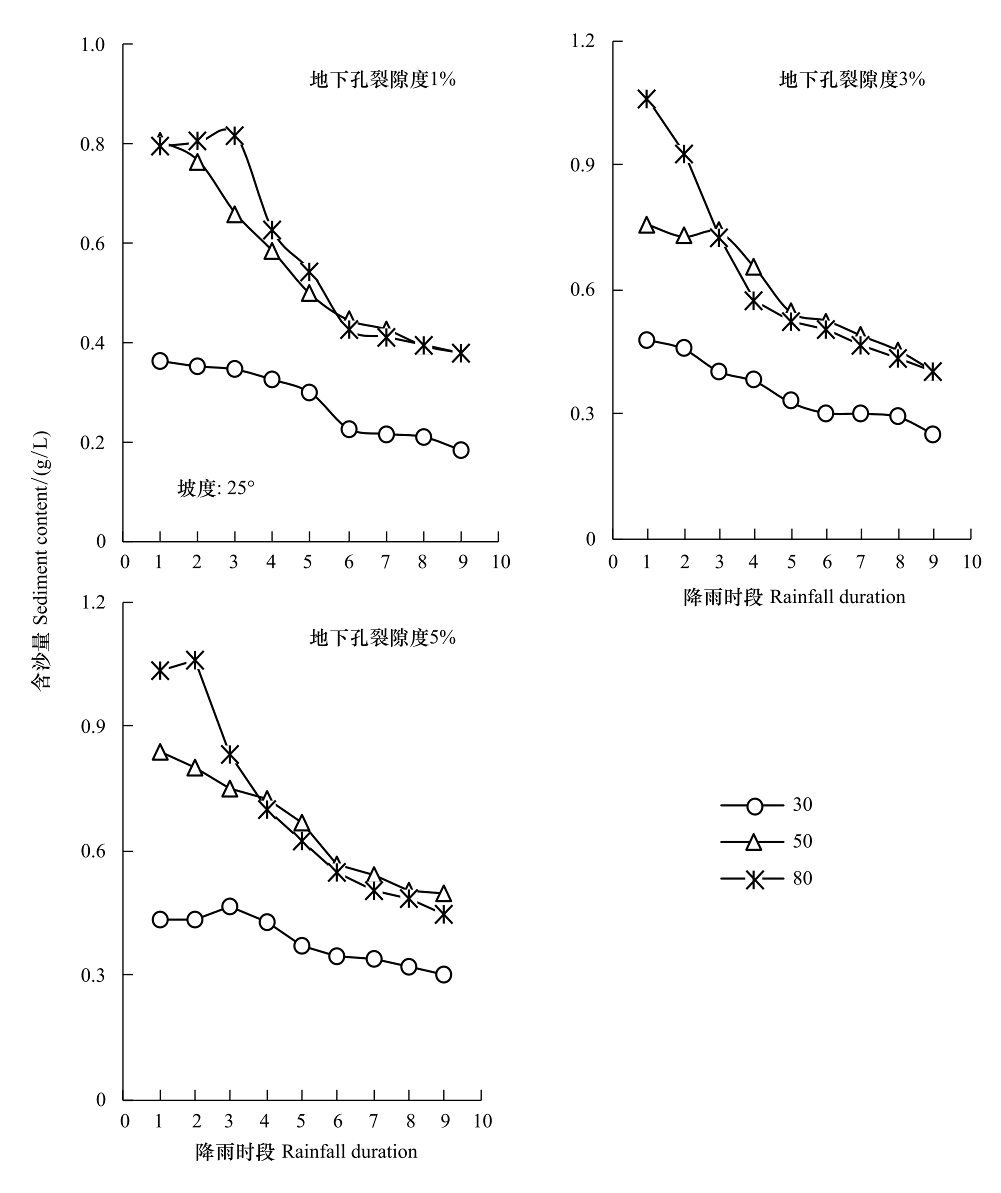


图 3　不同降雨强度条件下地下含沙量随降雨历时的变化特征

Fig.3　Variation of underground sediment concentration with increase of rainfall duration under different rainfall intensities

2.2.2　坡度对地下侵蚀产沙的影响

从图 5 可以看出,地下输沙模数随降雨历时的延长有显著性的变化,同时各坡度间的变化趋势有所不同。坡度为 10°的地下输沙模数总体上随降雨历时的延长呈线性减小变化(图 5);坡度为 15°,20°,25°时,第 1 个降雨时段输沙模数相对较小,在第 2 或第 3 降雨时段达到最大,之后随降雨历时延长呈线性减小变化趋势(图 5)。4 个坡度的各时段输沙模数减小均值分别为:2×10^{-3},1.67×10^{-3},1.56×10^{-3},1.33×10^{-3} g m^{-2} min^{-1}。可见,低坡度坡地在降雨过程中能够更好的抑制土壤颗粒随径流向下流失。

由图 6 可见,坡度对地下输沙模数有明显影响,随着坡度增大,地下输沙模数呈现减小变化趋势。坡度越大土壤颗粒沿顺坡方向的分力越大,这使得土壤颗粒之间的摩擦力增大,当摩擦力大于向下移动的作用力时,泥沙堆积在地下孔(裂)隙中。随着时间的延长,泥沙堆积量增大,导致输沙模数减小。

2.3　地下孔裂(隙)度对产流产沙的影响

2.3.1　地表与地下的产流随地下孔(裂)隙度的变化特征

喀斯特地区由于特殊的地上、地下水文"二元结构",使得该地区的水土流失不仅受地形因素影响,还与地下浅层孔(裂)隙有关。从表 3 可知,各坡度下地表与地下产流量的比值均随着地下孔裂隙度的增大,呈减

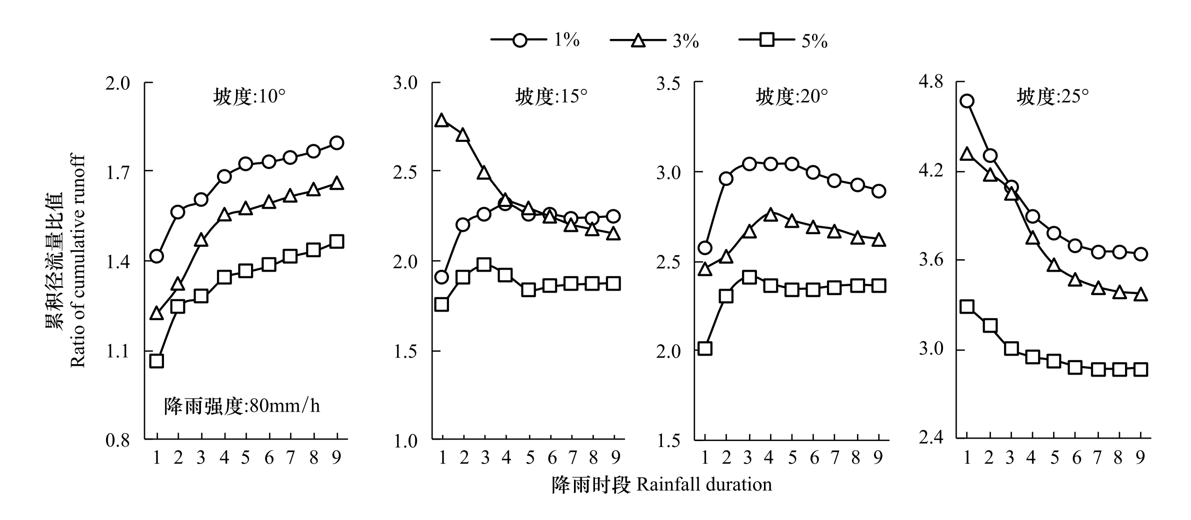


图 4 坡度对地表与地下累积径流量比值的影响特征

Fig.4 Effect of slope on the ratio of surface cumulative runoff volume to underground cumulative runoff volume

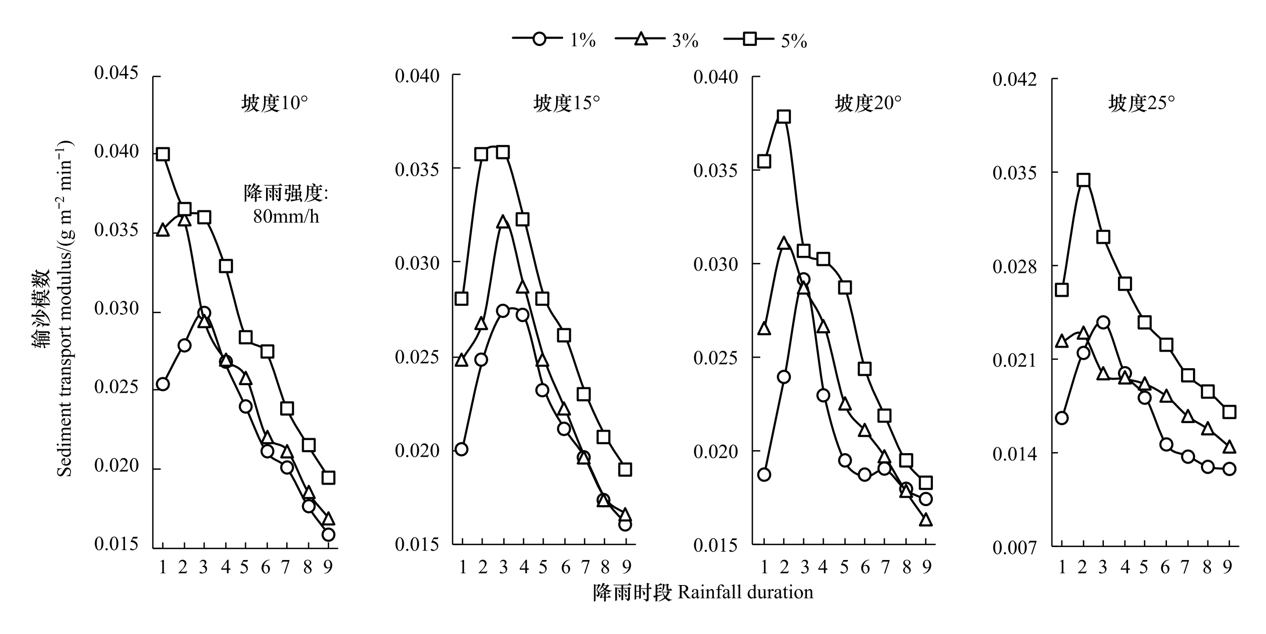


图 5 不同坡度下地下产沙随降雨历时的变化特征

Fig.5 Variation characters of underground sediment production for each rainfall duration under different slope conditions

小变化趋势,与地下孔(裂)隙度 1%条件下的径流量比值相比 3%的降低了 4.10%—9.60%,与地下孔(裂)隙度 1%条件下的径流量比值相比 3%的降低了4.10%—9.60%,9.93%—14.87%。通过对地下孔(裂)隙度与径流量比值的关系进行相关分析可知,地下孔(裂)隙度与径流量比值呈极显著负相关($P=0.000<0.01$),偏相关系数 $r=-0.903$。可见,地下孔(裂)隙的存在对喀斯特裸坡径流在空间上的分配影响显著。

图 7 反映的是随降雨历时延长的各降雨时段内地表与地下累积径流量的比值变化特征。比较 3 个地下孔(裂)隙度在同一降雨时段的累积径流量比值,可见随着地下孔(裂)隙度的增大累积径流量比值总体上呈

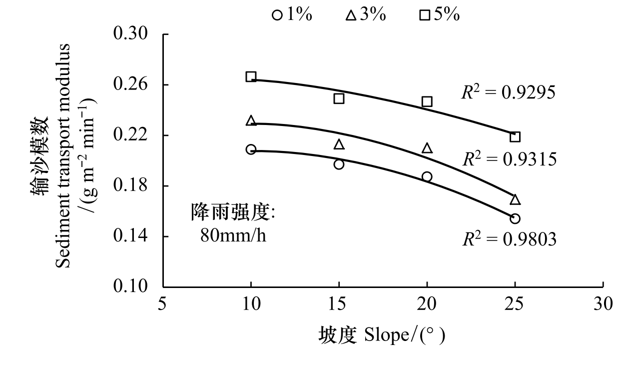


图 6 不同坡度下地下输沙模数变化特征图

Fig. 6 Characteristics of underground cumulative sediment production under different slope conditions

增大变化,大小顺序为 1%<3%<5%。通过对累积径流量比值与地下孔(裂)隙度的关系进行相关分析可知,累积径流量比值与地下孔(裂)隙度呈极显著正相关($P=0.005<0.01$),偏相关系数 $r=0.271$。

表 3　不同地下孔裂隙度条件下的地下产沙特征

Table 3　Characteristics of underground sediment yield under different degrees of underground hole (crack) conditions

坡度 Slope/(°)	地下孔(裂)隙度 Degree of underground hole (crack)					
	1%		3%		5%	
	地下径流量 Underground runoff/L	径流量比值 Ratio of runoff	地下径流量 Underground runoff/L	径流量比值 Ratio of runoff	地下径流量 Underground runoff/L	径流量比值 Ratio of runoff
10	198.80	1.80	209.15	1.66	225.05	1.47
15	182.75	2.25	189.85	2.16	208.80	1.88
20	162.70	2.90	174.00	2.62	192.80	2.36
25	135.55	3.65	141.50	3.38	160.05	2.87

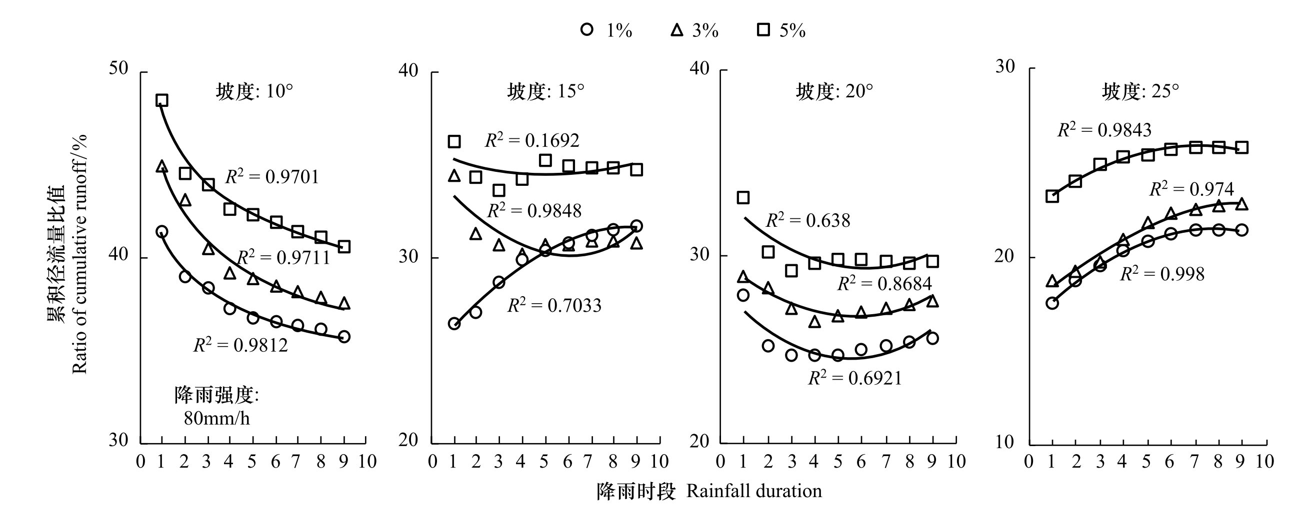


图 7　各降雨时段的地表与地下累积径流量比值变化特征

Fig.7　Ratio of surface runoff volume to underground runoff volume as a function of rainfall durations

综合坡度与地下孔(裂)隙度因素对地表与地下累积径流量比值的变化特征可以看到,10°坡度下随着降雨历时的延长,地表与地下累积径流量比值总体上呈下降变化(图 7),比较各降雨时段 3 个孔裂隙度之间累积径流量比值的差值,其中地下孔(裂)隙度 1%与 3%的随降雨历时的延长其差值逐渐减小,从第 1 时段的 4.09%降到第 9 时段的 1.75%,而 3%与 5%累积径流量比值之间的平均差为(3.33±0.002)%;15°坡度下 1%地下孔(裂)隙度的累积径流量比值总体上随降雨历时的延长呈上升趋势,而 3%与 5%的随降雨历时的变化相对平缓,其中 3%的累积径流量的均值为(29.74±1.94)%,5%的累积径流量的均值为(34.79±0.73)%(图 7);20°坡度条件下 3 个地下孔裂隙度的地表与地下累积径流量比值均随降雨历时的延长总体上呈先减小后增大的变化趋势,地下孔裂隙度 1%与 3%的累积径流量比值之间的平均差为(2.06±0.006)%,3%与 5%的累积径流量比值之间的差值从第 1 时段的 4.27%降至第 9 时段的 2.14%(图 7);25°坡度下,随降雨历时的延长,3 个地下孔(裂)隙度条件下的累积径流量比值总体上呈上升趋势,其中地下孔裂隙度 1%与 3%的累积径流量比值之间的平均差为(0.92±0.004)%,3%与 5%的累积径流量比值之间的差值从第 1 时段的 4.48%降至第 9 时段的3.90%(图 7)。

2.3.2　地下孔裂(隙)度对地表、地下产沙的影响

地下孔(裂)隙是喀斯特地区地下泥沙流失的主要通道,泥沙在地下径流的携带下通过地下孔(裂)隙发生地下土壤侵蚀。通过对地下产沙的比重分析可以了解地下产沙对整个降雨侵蚀产沙的贡献量以及裸坡地

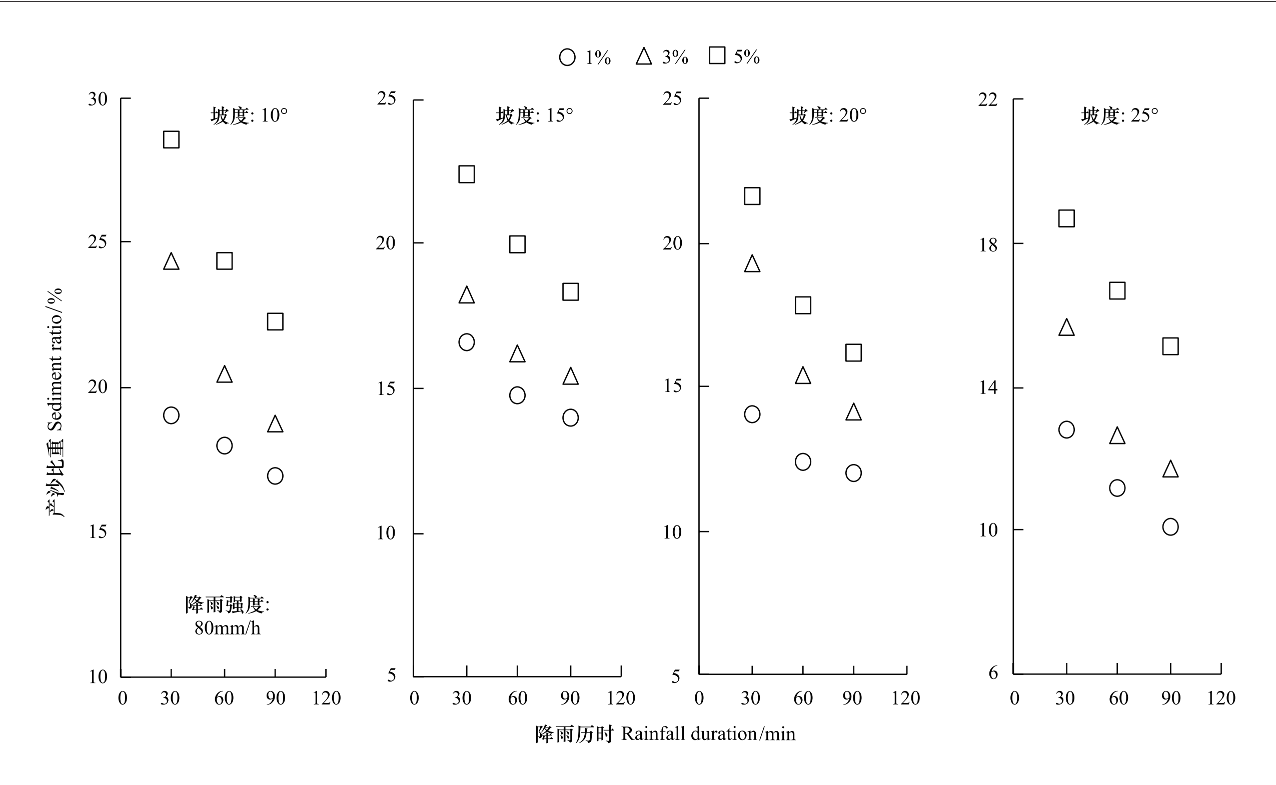


图 8 地下产沙量的比重随地下孔(裂)隙度变化图

Fig.8 Ratio of underground sediment to total sediment as a function of underground hole (crack)

产沙在空间上的分布特征。从图 8 可知,地下产沙比重在 10%—30%之间,说明 80 mm/h 降雨强度下,喀斯特裸坡侵蚀产沙以地表产沙为主。比较地下产沙比重随地下孔(裂)隙度变化特征可见,相同的降雨时长内地下产沙比重随地下孔(裂)隙度的增大而增大,地下产沙比重随地下孔(裂)隙度大小变化的顺序为 1%<3%<5%。对地下产沙比重与地下孔(裂)隙度进行相关性分析可知,地下产沙比重与地下孔裂隙度呈极显著正相关关系($P=0.000<0.01$),偏相关系数 $r=0.639$。分析降雨时长 30,60,90min 间的地下产沙比重变化趋势可见,随降雨时长的增加地下产沙比重呈减小变化,地下产沙比重随降雨时长变化的顺序为 30>60>90min。对地下产沙比重与降雨时长进行相关性分析可知,地下产沙比重与降雨时长呈极显著负相关关系($P=0.000<0.01$),偏相关系数 $r=-0.786$。综上可见,地下孔(裂)隙度增大为泥沙流失提供了更多的流失通道,使得坡地的地下土壤侵蚀产沙量也增大,最终导致喀斯特地区石漠化加剧,地表土被不连续,岩石出露,而地下岩溶管道储存着大量的土壤。同时,相同地下孔(裂)隙度及坡度条件下,降雨初期地下产沙量的比重最大,随降雨历时延长其比重逐渐减小。究其原因是泥沙间摩擦力存在,使得泥沙运移变缓,逐渐堆积在地下孔(裂)隙中,而随着时间延长,积累的泥沙量增多,导致运移通道变小,从而阻碍了泥沙向下移动。因此,野外常常可见地下岩溶管道淤积大量泥土,而非是全部通过地下岩溶管道向下流失,故地下孔(裂)隙土壤赋存量是值得关注方向。

3 讨论

3.1 喀斯特裸坡产流产沙对降雨强度的响应

降雨强度是影响坡地土壤侵蚀的主要影响因子,降雨强度的增大能够提供更多的径流量,同时降雨强度的增大提高降雨对地表土壤的打击力,增加溅蚀量,为侵蚀产沙提供更多的土粒[26]。当降雨强度增大到一定程度时,会促进地表结皮的形成,降低土壤入渗,耿晓东等研究发现降雨强度增大到 100 mm/h 时,雨滴动能增大促进土壤表面物理结皮的形成,导致土壤入渗降低[27]。喀斯特地区地下孔(裂)隙的存在使得该地区地表产流以蓄满产流为主,张志才等的研究发现喀斯特地区表土层入渗率为 133mm/d,而裂隙渗透系数高达

8464mm/d。因此,一般暴雨入渗率远小于表土层和裂隙的入渗率,导致喀斯特地区地表产流以蓄满产流为主。本研究中,在降雨强度为 30、50 mm/h 的条件下,90min 降雨历时内坡面无地表径流,产流行为以地下孔(裂)隙产流为主。这也是导致喀斯特地区水土流失隐蔽性和保水能力差的主要原因[28];当降雨强度为 80 mm/h 时,地表与地下均有径流产生,同时该雨强下的地下产流量小于 30、50 mm/h 的地下产流量,可见该降雨强度下地表产流率大于土壤入渗率,同时由于雨滴击打地表产生物理结皮影响土壤入渗,使得该降雨强度下的地下产流量最小。

地表土壤在雨滴击打下分散成土壤颗粒为侵蚀产沙提供物质来源,径流是水力侵蚀的主要驱动力[29]。本研究中地表产流存在临界降雨强度,使得地表仅在 80 mm/h 降雨强度下发生侵蚀产沙。在 30,50,80 mm/h 降雨强度下,雨滴溅蚀地表土壤分散的土粒随径流进入地下孔(裂)隙发生产沙行为,地下输沙率在 1.03—2.05 g/min。这与戴全厚等通过人工降雨模拟喀斯特坡耕地侵蚀产沙得到的结果相似[30]。因此,喀斯特地区在进行石漠化治理的研究中更应该关注小雨强(<80 mm/h)下的土壤侵蚀。

3.2　喀斯特裸坡产流产沙对坡度的响应

坡度对坡面侵蚀有显著性影响,坡度增大使地表径流增加,减小土壤入渗,提高径流冲刷能力[31]。Grosh 和 Jarrett 通过人工模拟降雨实验得到坡度增大能促进溅蚀量的增加[32]。Wang 等研究得到降雨溅蚀产生的土壤颗粒会堵塞 80%的地表土壤大孔隙[33]。本研究中地表与地下累积径流量的比值随坡度的增大而增大,大小顺序为坡度 25°>20°>15°>10°。坡度从缓坡变为陡坡时(坡度由 10°增大至 25°),缓坡的径流量的比值随着降雨历时的延长呈增大变化,而陡坡径流量比值随降雨历时的延长表现为先减小后趋于平缓的变化趋势。其原因是相对小的坡度(坡度为 10°,15°,20°)条件下坡面径流冲刷量小于土壤孔隙的填充量,而陡坡条件(坡度=25°)下,坡面径流冲刷力增大,使填充在土壤孔隙中的土粒被冲走,导致土壤入渗率增大,地表径流量减小。地下产沙是由于土粒被径流携裹向下运动产生的,基于此原因,10°坡度时输沙模数在单位时间内的减小量最大,随坡度的增大 4 个坡度的单位时间(10min)内输沙模数减小均值分别为:2×10^{-3},1.67×10^{-3},1.56×10^{-3},1.33×10^{-3} g m^{-2} min^{-1}。可见,低坡度坡地在降雨过程中能够更好的抑制土壤颗粒随径流向下流失。

3.3　喀斯特裸坡产流产沙对地下孔(裂)隙度的响应

喀斯特地区碳酸盐岩广泛分布,Gunn 等认为碳酸盐岩在酸化后的雨水作用下行程的地下岩溶孔(裂)隙管道是地下漏失的通道[34-35]。地下孔(裂)隙的存在使得该地区地表径流携带的土壤物质淤积在孔裂隙中,最终沿地下孔裂隙发生地下流失[36]。冯腾等运用^{137}CS 示踪技术在桂西北喀斯特坡地剖面分布特征的应用试验中指出喀斯特地表土粒在降雨径流作用下进入地下孔(裂)隙中[37]。本研究中地下孔(裂)隙度与径流量比值呈极显著负相关($P=0.000<0.01$),偏相关系数 $r=-0.903$,随着地下孔(裂)隙度的增大,地表与地下径流量比值呈减小变化,地下产流量呈增大变化。李晋等在 2009—2010 年一个完整水文年对王家寨小流域的监测得到该流域地下土壤侵蚀模数为 0.42t km^{-2} a^{-1},占地表、地下总产沙量的 0.81%[38]。本实验结果表明,地下产沙比重与降雨时长呈极显著负相关关系($P=0.000<0.01$),偏相关系数 $r=-0.786$,表现为地下产沙比重随降雨历时的延长而减小,地下产沙比重随降雨时长变化的顺序为 30>60>90min。这是由于土粒间摩擦力的作用大于向下移动的作用力,使土粒进入地下孔(裂)隙后淤积在地下孔(裂)隙中,这与张兴宝等关于喀斯特地下土壤向下蠕移及土壤漏失的研究结果一致[39]。

4　结论

(1)降雨是引发坡面侵蚀的主要驱动力,本研究中 30、50、80 mm/h 降雨强度下地表仅在 80 mm/h 降雨强度下有产流产沙行为,表明在 50—80 mm/h 之间存在地表开始产流、产沙的临界降雨强度,地下孔(裂)隙在 30,50,80 mm/h 降雨强度下均有侵蚀性产沙,50 mm/h 降雨强度下的地下产流量最大,30 mm/h 的次之,80 mm/h 的最小,50 mm/h 降雨强度下的地下产沙量最大,80 mm/h 的次之,30 mm/h 的最小。由此可见喀斯特地区开展土壤侵蚀研究时更应关注相对较小降雨强度下的土壤侵蚀。

(2)本研究中 80 mm/h 的降雨强度下,随着坡度的增大径流更多以地表径流形式流失,表现为各降雨时段的地表与地下累积径流量的比值随坡度的增大而增大,大小顺序为坡度 25°>20°>15°>10°。90min 的降雨历程内,地下输沙模数随坡度的增大而减小,各测定时段间低坡度的输沙模数减小均值最大。可见,缓坡能减缓土壤颗粒随径流向下流失,但在降雨过程中更多的径流从地下流失。

(3)地下孔(裂)隙的存在加快了喀斯特坡地石漠化,本研究中地下产流比重与产沙比重均随地下孔(裂)隙的增大而增大,比重大小顺序为 1%<3%<5%。地下产沙比重随降雨历时的延长而减小。地下径流与土壤中 CO_2作用酸化后会加速地下孔(裂)隙的形成,可见喀斯特石漠化是一个破坏后就不断加速的过程。富集在地下孔(裂)隙中的土壤在地下径流的作用下以蠕移形式通过地下岩溶通道流失。喀斯特地区耕地以坡耕地为主,在坡耕地水土流失时以坡改梯为主,在治理的过程中不能仅对地表进行拦挡和石块的搬移,应同时考虑对耕地地下的治理。

参考文献(References):

[1] 王德炉, 朱守谦, 黄宝龙. 贵州喀斯特石漠化类型及程度评价. 生态学报, 2005, 25(5): 1057-1063.
[2] Römkens M J M, Helming K, Prasad S N. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. Catena, 2002, 46(2/3): 103-123.
[3] 王德炉. 喀斯特石漠化的形成过程及防治研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2003.
[4] Oliva P. Karst et structure dans le plateau des Akhsass (Anti-Atlas occidental- Maroc). Revue De Géographie Alpine, 1978, 66(3): 313-322.
[5] 何永彬, 张信宝, 文安邦. 西南喀斯特山地的土壤侵蚀研究探讨. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2393-2398.
[6] Field M S. A lexicon of cave and karst terminology with special reference to environmental karst hydrology. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2002:107.
[7] 袁道先. 中国岩溶学. 北京: 地质出版社, 1993: 44-52, 92-129.
[8] 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势. 地球科学进展, 2007, 22(6): 573-582.
[9] 李晋, 熊康宁. 我国喀斯特地区水土流失研究进展. 土壤通报, 2012, 43(4): 1001-1007.
[10] 凡非得, 王克林, 熊鹰, 宣勇, 张伟, 岳跃民. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征. 生态学报, 2011, 31(21): 6353-6362.
[11] 徐则民, 黄润秋, 唐正光, 费维水. 中国南方碳酸盐岩上覆红土形成机制研究进展. 地球与环境, 2005, 33(4): 29-36.
[12] 刘志刚. 广西都安县石灰岩地区土壤侵蚀的特点和水土保持工作的意见. 林业科学, 1963, 8(4): 354-360.
[13] 陈晓平. 喀斯特山区环境土壤侵蚀特性的分析研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(4): 31-36.
[14] 王恒松, 熊康宁, 刘云. 喀斯特区地下水土流失机理研究. 中国水土保持, 2009, (8): 11-14.
[15] 周念清, 李彩霞, 江思珉, 唐益群. 普定岩溶区水土流失与土壤漏失模式研究. 水土保持通报, 2009, 29(1): 7-11.
[16] 唐益群, 张晓晖, 周洁, 佘恬钰, 杨坪, 王建秀. 喀斯特石漠化地区土壤地下漏失的机理研究——以贵州普定县陈旗小流域为例. 中国岩溶, 2010, 29(2): 121-127.
[17] 张信宝, 王世杰, 曹建华. 西南喀斯特山地的土壤硅酸盐矿物物质平衡与土壤流失. 地球与环境, 2009, 37(2): 97-102.
[18] 杨智, 戴全厚, 黄启鸿, 吴学强. 典型喀斯特坡面产流过程试验研究. 水土保持学报, 2010, 24(4): 78-81.
[19] 刘正堂, 戴全厚, 杨智. 喀斯特裸坡土壤侵蚀模拟研究. 中国岩溶, 2014, 33(3): 356-362.
[20] 戴全厚, 喻理飞, 杨智, 王佩将. 一种用于研究坡面径流和地下孔裂隙流的模拟试验装置: 中国, ZL201010545602.7. 2012-05-02.
[21] 张文源, 王百田, 杨光檄, 张科利. 喀斯特黄壤区侵蚀性降雨及产沙特征分析. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1776-1782.
[22] 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究Ⅲ——关于侵蚀性降雨的标准问题. 水土保持通报, 1984, (2): 58-63.
[23] 吴普特, 周佩华. 黄土坡面薄层水流侵蚀试验研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 40-55.
[24] 张志才, 陈喜, 程勤波, 彭韬, 张艳芳, 纪忠华. 喀斯特山体表层岩溶带水文地质特征分析——以陈旗小流域为例. 地球与环境, 2011, 39(1): 19-25.
[25] 李桂芳, 郑粉莉, 卢嘉, 安娟. 降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响. 农业机械学报, 2015, 46(4): 147-154, 182-182.
[26] 王占礼, 王亚云, 黄新会, 牛振华. 黄土裸坡土壤侵蚀过程研究. 水土保持研究, 2004, 11(4): 84-87.
[27] 耿晓东, 郑粉莉, 张会茹. 红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究. 水土保持学报, 2009, 23(4): 39-53.
[28] 柴宗新. 试论广西岩溶区的土壤侵蚀. 山地研究, 1989, 7(4): 255-260.
[29] Blanco-Canqui H, Lal R. Principles of Soil Conservation and Management. Vadose Zone Journal, 2010, 9(1):199-200.
[30] Dai Q, Liu Z, Shao H, Yang Z. Karst bare slope soil erosion and soil quality: a simulation case study. Solid Earth, 2015, 6(3): 985-995.

[31] 王秀英, 曹文洪, 陈东. 土壤侵蚀与地表坡度关系研究. 泥沙研究, 1998, (2): 36-51.

[32] Grosh J L, Jarrett A R. Interrill erosion and runoff on very steep slopes. Transactions of the ASAE, 1994, 37(4): 1127-1133.

[33] Wang D, Lowery B, Norman J M, McSweeney K. Ant burrow effects on water flow and soil hydraulic properties of Sparta sand. Soil and Tillage Research, 1996, 37(2/3): 83-93.

[34] Gunn J. Turloughs and tiankengs: Distinctive doline forms. Cave and Karst Science, 2005, 32(2/3): 83-84.

[35] Palmer A N. Origin and morphology of limestone caves. Geological Society of America Bulletin, 1991, 103(1): 1-21.

[36] 熊康宁, 李晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题. 地理学报, 2012, 67(7): 878-888.

[37] 冯腾, 陈洪松, 张伟, 聂云鹏, 王克林. 桂西北喀斯特坡地土壤^{137}Cs 的剖面分布特征及其指示意义. 应用生态学报, 2011, 22(3): 593-599.

[38] 李晋, 熊康宁, 王仙攀. 喀斯特地区小流域地下水土流失观测研究. 中国水土保持, 2012, (6): 38-50.

[39] 张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 汪阳春, 何永彬. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失. 地球与环境, 2007, 35(3): 202-206.